

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ І МАШИНИ ГАЛУЗІ – 1.
ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункової роботи студентів денної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

Рекомендовано Вченою радою інженерно-хімічного факультету

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

Процеси, апарати машини галузі - 1. Теплові процеси:

Метод. вказівки до викон. розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для студ. денної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / Уклад.: В.В. Малиновський, І.О. Казак. – К.: НТУУ «КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО», 2016.– 34 с.

*Гриф надано Вченою радою ІХФ
(Протокол № 7 від 26.09. 2016 р.)*

Навчальне видання

ПРОЦЕСИ, АПАРАТИ І МАШИНИ ГАЛУЗІ – 1. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи студентів денної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

Авторська редакція

Укладачі:

В.В. Малиновський, к.т.н., доц.
І.О. Казак, к.п.н.

Відповідальний редактор

Д.Е. Сідоров, к.т.н., доц.

Рецензент:

А.Р. Степанюк, к.т.н., доц.

ВСТУП

Кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» входить до вибіркової частини навчального плану бакалаврів денної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» і відноситься до дисциплін самостійного вибору навчального закладу.

Згідно освітньо-професійної програми бакалаврів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» формує здатність робити обґрунтований вибір обладнання для реалізації теплообмінних процесів та виконувати їх параметричні розрахунки.

Кредитний модуль «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» базується на знанні студентом математики, інформатики, нарисної геометрії, хімії, фізики, теоретичні основи теплотехніки та інших наук, таких як: «Вища математика» (розділи: інтегральне та диференціальне обчислення), «Інженерні розрахунки на ПЕОМ» (розділ: робота з електронними таблицями), «Фізика» (розділ: механіка), «Хімія» (розділ: властивості речовин), а також дисциплін «Опір матеріалів» і «Механіка твердого деформованого тіла». Він є базовим для вивчення наступних кредитних модулів: «Процеси, апарати і машини галузі - 2. Механічні процеси», «Процеси, апарати і машини галузі - 3. Гідромеханічні процеси» та інших дисциплін «Пакувальне обладнання», «Технологія машинобудування». Матеріал кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» викладається на 3-му курсі навчання бакалаврів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації

«Машини і технології пакування» і спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів».

Метою кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» та 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» є оволодіння студентами не лише теорією, а і методами розрахунків основних теплових процесів, машин і апаратів, та використання одержаних знань при вивченні спеціальних дисциплін, а також у фаховій діяльності.

Метою розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» для бакалаврів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» і 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» є оволодіння студентами не лише теорією, а здобуття навичок виконувати розрахунки за темами «Конденсація» і «Теплопередача», які винесені на розрахункову роботу студентів з даного кредитного модуля.

1. Загальні положення щодо організації розрахункової роботи студентів

Розрахункова робота студентів з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» передбачається робочим навчальним планом для бакалаврів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» та 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» на 3-му курсі у 6-му семестрі.

У методичних вказівках представлені методики розрахунків за такими видами теплообміну, як конденсація і теплопередача, які не виносяться на закріплення на аудиторних заняттях, а закріплюються самостійно студентами при виконанні розрахункової роботи студентів з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси». На це відводиться певна кількість годин самостійної роботи від загальної кількості годин на вивчення даного кредитного модуля згідно його робочої навчальної програми. Це завдання корисно для вивчення майбутніми інженерами-механіками спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» та 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Машини і технології пакування» в зв'язку з тим, що дуже часто застосовується у реальних умовах роботи процесів і апаратів хімічної технології та обладнання хімічних і пакувальних виробництв, як приклад розв'язання характерних задач при заданих умовах.

Після вивчення теоретичного матеріалу на лекційних заняттях тем «Конденсація», «Теплопередача» викладач видає студентам завдання для виконання розрахункової роботи з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси». При видачі завдання на розрахункову роботу для студентів передбачена багатоваріантна система умов завдання. Варіанти відповідають порядковому номеру n студента у списку групи та додатковим даним за варіантами згідно таблиць 4.1 і 4.2 даних методичних вказівок. В додатках цих методичних вказівок наведені необхідні довідникові дані у таблицях, які використовуються при розрахунках завдання даної розрахункової роботи.

Оформлюється розрахункова робота на листах формату А4 за методиками розрахунків, які наведені у цих методичних вказівках. Зразок титульного листа представлений у додатку 5 методичних вказівок.

Виконане завдання розрахункової роботи здається студентом для перевірки викладачу наприкінці вивчення кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі - 1. Теплові процеси» та оцінюється згідно рейтингової системи оцінювання даного кредитного модуля.

Успішне виконання завдання даної розрахункової роботи можливе за умови наявності у студентів певних знань з теоретичних відомостей за темами «Конденсація» і «Теплопередача», методик розрахунків цих теплових процесів та навичок виконувати їх, а також уміння проводити аналіз отриманих результатів розрахунків.

2. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

Процес ламінарного стікання плівки конденсату для циліндричної поверхні, яка розміщена горизонтально, критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = 0,72 (Ga \text{ Pr } \Pi)^{0,25} \quad (2.1)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$ - критерій Нусельта;

α - інтенсивність тепловіддачі при конденсації, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

h - висота поверхні, м;

λ - коефіцієнт теплопровідності плівки конденсату, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$;

$Ga = \frac{gh^3}{\nu^2}$ - критерій Галілея;

ν - кінематична в'язкість плівки конденсату, $\frac{м^2}{с}$

Pr - критерій Прандтля, який визначається при середній температурі плівки конденсату $t = 0,5 \cdot (t_n + t_{cm})$,

де t_n - температура пари, $^{\circ}C$; t_{cm} - температура стінки, $^{\circ}C$;

$$Pi = \frac{r}{C \Delta t} \text{ - критерій фазового переходу;}$$

r - прихована теплота пароутворення, яка визначається при температурі пари t_n , $\frac{kJ}{kg}$;

$$C \text{ - питома теплоємність пари, } \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}C};$$

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^{\circ}C$.

Перепад температур між парою і стінкою (трубою) за формулою (2.3):

$$\Delta t = t_n - t_{cm}, ^{\circ}C \quad (2.3)$$

Визначальним розміром для циліндричної поверхні, яка розміщена горизонтально в критеріях є зовнішній діаметр циліндричного тіла d .

Продуктивність апарата по конденсату (або маса сконденсованої пари) за формулою (2.4):

$$G = \frac{Q}{r}, \quad \frac{kg}{s} \quad (2.4)$$

де $Q = \alpha F \Delta t$ – потужність теплового потоку, kW ;

$$r \text{ – прихована теплота пароутворення, } \frac{kJ}{kg};$$

F – площа поверхні труби, m^2 ;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^{\circ}C$.

3. Методика виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

Задача №1

Середня температура плівки конденсату сухої насиченої пари $t_c = 90 + n$, °C, а температура поверхні труби $t_{ct} = 50 + n$, °C. Визначити тиск пари в апараті і масу пари, яка сконденсується за годину на горизонтальній трубі діаметром $d = (n + a_1)$, мм і довжиною $L = (0,5 \cdot n + a_2)$, м, де n – порядковий номер студента за списком академічної групи.

Розглянемо методику виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»:

1. Температуру плівки конденсату сухої насиченої пари розраховують за формулою (3.5):

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot (t_n + t_{cm}) \quad (3.5)$$

де t_n – температура пари в апараті, °C ;

t_{cm} – температура поверхні стінки (труби), °C ;

t_c – температура плівки конденсату сухої насиченої пари, °C .

З формули (2.1) знаходимо температуру пари в апараті за формулою (3.6):

$$t_n = 2 \cdot t_c - t_{cm} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

2. Тиск в апараті P_n і приховану теплоту пароутворення r_n визначають з додатку 4 таблиці 4 за температурою пари в апараті t_n :

$$P_n = f(t_n) , \text{ Па};$$

$$r_n = f(t_n), \frac{\kappa_{ДЖ}}{\kappa_2}.$$

3. Перепад температур між парою і стінкою (трубою) визначають за формулою (3.7):

$$\Delta t = t_n - t_{cm} \text{ } ^\circ C \quad (3.7)$$

4. Визначимо фізичні властивості плівки конденсату λ , C , ν , Pr за температурою плівки конденсату сухої насиченої пари t_c визначають з додатку 2 таблиці 2.

5. Критерій Галілея визначають за формулою (3.8):

$$Ga = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2}, \quad (3.8)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\frac{m}{c^2}$; ($g = 9,8 \frac{m}{c^2}$)

ℓ – визначальний розмір, m , (для горизонтальної труби визначальним розміром є зовнішній діаметр труби $\ell = d$);

ν – кінематична в'язкість, $\frac{m^2}{c}$.

6. Критерій фазового переходу визначають за формулою (3.9):

$$Pi = \frac{r}{C \cdot \Delta t} \quad (3.9)$$

де r – прихована теплота пароутворення, $\frac{\kappa_{ДЖ}}{\kappa_2}$;

C – теплоємність плівки конденсату, $\frac{\kappa_{ДЖ}}{\kappa_2 \cdot ^\circ C}$;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ C$.

7. Критерій Нусельта визначають за формулою (3.10):

$$Nu = 0,72 (Ga \cdot Pr \cdot \Pi)^{0,25} \quad (3.10)$$

8. Коефіцієнт тепловіддачі визначають за формулою (3.11):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (3.11)$$

9. Площу поверхні труби визначають за формулою (3.12):

$$F = \pi \cdot d \cdot L, \quad (3.12)$$

де F – площа поверхні труби, m^2 ; $\pi=3,14$

d – зовнішній діаметр горизонтальної труби в апараті, m ;

L – довжина горизонтальної труби, m .

10. Потужність теплового потоку визначають за формулою (3.13):

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (3.13)$$

де Q – потужність теплового потоку між парою і трубою, яка передається тепловіддачею, Вт;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{Вт}{m^2 \cdot ^\circ C}$;

F – площа поверхні теплообміну, m^2 ;

Δt – перепад температур між парою і трубою, $^\circ C$.

11. Масу сконденсованої пари визначають за формулою (3.14):

$$G = \frac{Q}{r}, \quad (3.14)$$

де G – маса сконденсованої пари, $\frac{кг}{с}$;

Q - потужність теплового потоку між парою і трубою, яка передається тепловіддачею, Вт;

r – прихована теплота пароутворення, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Розглянемо приклад виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація».

Дано:

$$t_c = 90^\circ\text{C}$$

$$t_{ct} = 50^\circ\text{C}$$

$$d = 80 \text{ мм}$$

$$L = 1,5 \text{ м}$$

$$P_n - ? \quad G - ?$$

Рішення:

1. Температура плівки конденсату сухої насиченої пари:

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot (t_n + t_{cm}) , ^\circ\text{C} .$$

Звідси знаходимо температуру пари в апараті

$$t_n = 2 \cdot t_c - t_{cm} = 2 \cdot 90 - 50 = 130^\circ\text{C}$$

2. Тиск в апараті P_n і приховану теплоту пароутворення r_n визначаємо з додатку таблиці Д4 за температурою пари в апараті t_n :

$$P_n = f(t_n) = 2,7 \cdot 10^5, \text{ Па};$$

$$r_n = f(t_n) = 2174,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} .$$

3. Перепад температур між парою і трубою

$$\Delta t = t_n - t_{cm} = 130 - 50 = 80^\circ\text{C}$$

4. Визначимо фізичні властивості плівки конденсату λ , C , ν , Pr за температурою плівки конденсату сухої насиченої пари t_c визначаємо з додатку таблиці Д2.

$$\lambda = 0,68 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}, \quad C = 4,22 \frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}, \quad \nu = 0,326 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}, \quad Pr = 1,95$$

5. Критерій Галілея

$$Ga = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,08^3}{(0,326 \cdot 10^{-6})^2} = 4,72 \cdot 10^{10}$$

де ℓ – визначальний розмір для горизонтальної труби визначальним розміром є зовнішній діаметр труби $\ell = d = 0,08 \text{ м}$.

6. Критерій фазового переходу

$$Pr = \frac{r}{C \cdot \Delta t} = \frac{2174,3}{4,22 \cdot 80} = 6,44$$

7. Критерій Нусельта

$$Nu = 0,72 (Ga \cdot Pr \cdot Pr)^{0,25} = 0,72 \cdot (4,72 \cdot 10^{10} \cdot 1,95 \cdot 6,44)^{0,25} = 631$$

8. Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{631 \cdot 0,68}{0,08} = 5364 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

9. Площу поверхні труби

$$F = \pi \cdot d \cdot L = 3,14 \cdot 0,08 \cdot 1,5 = 0,3768 \text{ м}^2$$

10. Потужність теплового потоку

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t = 5364 \cdot 0,3768 \cdot 80 = 161692 \text{ Вт} = 161,7 \text{ кВт}$$

11. Маса сконденсованої пари

$$G = \frac{Q}{r} = \frac{161,7}{2174,3} = 0,0743 \frac{\text{кґ}}{\text{с}} = 268 \frac{\text{кґ}}{\text{год}}$$

4. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

Потужність теплового потоку теплопередачею через стінку визначається за формулою (4.1):

$$Q = K \cdot (t_{p_1} - t_{p_2}) \cdot F, \quad (4.1)$$

де Q - потужність теплового потоку через стінку, Вт;

K – коефіцієнт теплопередачі на 1 м² площі теплообміну, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

F – площа поверхні теплообміну, м² ;

t_{p_1}, t_{p_2} - середні температури рідини з обох боків стінки, $^\circ\text{C}$.

Питомий тепловий потік, Вт/м:

$$q = K \cdot (t_{p_1} - t_{p_2}) \quad (4.2)$$

В рівнянні (4.2) середній перепад температур при прямотечії (протитечії) рідин

$$t_{p_1} - t_{p_2} = \Delta t_c = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_m}}, \quad (4.3)$$

де Δt_δ - більший перепад температур теплоносіїв з обох боків стінки, $^\circ\text{C}$;

Δt_m - менший перепад температур, $^\circ\text{C}$.

Для циліндричної стінки лінійний коефіцієнт теплопередачі (на 1 м довжини каналу), $\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_1^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}}, \quad (4.4)$$

де $d_1, d_2, \dots, d_n, d_{n+1}$ - діаметри шарів стінки, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ - коефіцієнти теплопровідності матеріалів, з яких виготовлені шари стінки, $\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$.

Потужність теплового потоку, яка передається теплопередачею, для циліндричної стінки, Вт

$$Q_l = q_l \cdot l = K \cdot l \cdot \Delta t_c \quad (4.5)$$

5. Методика виконання розрахунку задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

Задача №2

В горизонтальному теплообмінному апараті, який складається з $N = (n + a_1)$ труб з матеріалу a_2 , розміщених в кожусі діаметром $D = (0,1 \cdot n + 0,1)$, м підігрівається вода. Гаряча вода, яка тече в трубах діаметрами $d_1/d_2 = a_3/a_4$, охолоджується від температури $t'_1 = (n + a_5)^\circ C$ до $t''_1 = (n + a_6)^\circ C$. Холодна вода, яка тече вздовж трубок в кожусі, нагрівається від

температури $t_2' = (n + a_7)^\circ C$ до $t_2'' = (n + a_8)^\circ C$. Потужність теплового потоку через поверхню нагрівання $Q = 10 \cdot n + a_9, кВт$.

Визначити довжину кожуха l теплообмінного апарату для прямотечії і протитечії рідин для чистих труб, та труб з шаром накипу товщиною $\delta_n = a_{10}, мм$ та коефіцієнтом теплопровідності накипу $\lambda_n = a_{11}, Вт / м \cdot град$. Вибрати найкращі умови теплопередачі.

Побудувати графіки для середнього температурного напору у теплообміннику за умов прямотечії і протитечії руху рідини у трубках без шару накипу і з урахуванням товщини шару накипу в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

Розглянемо методику виконання задачі №2 за темою «Теплопередача» розрахункової роботи студентів:

1. Визначальна температура:

$$\text{гарячої води} \quad t_z = \frac{t_1' + t_1''}{2}, ^\circ C \quad (5.1)$$

$$\text{холодної води} \quad t_x = \frac{t_2' + t_2''}{2}, ^\circ C \quad (5.2)$$

2. Теплофізичні властивості за додатком у таблиці Д2 при визначальній температурі гарячої води t_z : $C_z, \rho_z, \nu_z, \lambda_z, Pr_z$; холодної води при визначальній температурі холодної води t_x : $C_x, \rho_x, \nu_x, \lambda_x, Pr_x$.

3. Витрати гарячої води G_z та холодної води G_x знаходимо з рівняння (5.3) за формулами (5.4) та (5.5):

$$Q = C \cdot G \cdot \Delta t, \quad (5.3)$$

де C – питома теплоємність рідини, $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$;

G – витрати рідини, $кг/с$;

Δt - перепад температур на вході в апарат і виході з нього.

Тоді:

$$G_2 = \frac{Q}{C_2 \cdot (t_1' - t_1'')}, \text{ кг/с} \quad (5.4)$$

$$G_x = \frac{Q}{C_x \cdot (t_2'' - t_2')}, \text{ кг/с} \quad (5.5)$$

Значення C_2 і C_x взяти при середніх температурах t_2 і t_x відповідно.

4. Визначальний розмір для гарячої води – це d_1 без накипу з умови задачі №2, м;

для холодної води – еквівалентний діаметр міжтрубного простору:

$$d_{екв} = \frac{D^2 - N \cdot d_2^2}{D + N \cdot d_2}, \text{ м} \quad (5.6)$$

5. Швидкість гарячої та холодної води визначають за формулами (5.7) та (5.8):

$$V_2 = \frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot N \cdot \rho_2 \cdot d_1^2}, \text{ м/с} \quad (5.7)$$

$$V_x = \frac{4 \cdot G_x}{\pi \cdot \rho_x \cdot d_{екв}^2}, \text{ м/с} \quad (5.8)$$

6. Критерій Рейнольдса для гарячої та холодної води визначають за формулами (5.9) та (5.10):

$$Re_z = \frac{V_z \cdot d_1}{\nu_z} \quad (5.9)$$

$$Re_x = \frac{V_x \cdot d_{екв}}{\nu_x} \quad (5.10)$$

7. Режим руху рідини визначають за формулами (5.11) або (5.12) або (5.13) за критерієм Рейнольдса для гарячої та холодної води окремо.

Якщо $Re < 3000$, то режим ламінарний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.11):

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot Pr_c^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.11)$$

Якщо $3000 < Re < 10000$, то режим перехідний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.12):

$$Nu = 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,3} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.12)$$

Якщо $Re > 10000$, то режим турбулентний і критерій Нусельта розраховують за виразом (5.13):

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad (5.13)$$

Відношенням ($Pr_c / Pr_p = 1$) можна знехтувати для визначення критерію Нусельта, де Pr_c приймається за додатком 1 у таблиці 1 .

8. Коефіцієнти тепловіддачі гарячої та холодної води визначають за формулами (5.14) та (5.15):

$$\alpha_z = \frac{Nu_z \cdot \lambda_z}{d_1}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (5.14)$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{екв}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (5.15)$$

9. Для одношарової циліндричної стінки товщиною $(d_1 - d_2)/2$ лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l визначають за формулою (5.16):

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_z \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}}, \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \quad (5.16)$$

10. Побудувати графіки для розрахунку середнього температурного напору для прямотечії і протитечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

11. Середній температурний напір для прямотечії визначають за формулою (5.17):

$$\Delta t_{np} = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} - \Delta t_{\bar{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\delta}}}{\Delta t_{\bar{м}}}} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}}, ^\circ C \quad (5.17)$$

а для протитечії визначають за формулою (5.18):

$$\Delta t_{npom} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mathcal{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mathcal{M}}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} , ^\circ C \quad (5.18)$$

12. Довжина корпусу теплообмінника:

$$l = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{np(npom)}} , \text{ м} \quad (5.19)$$

13. Для врахування впливу товщини шару накипу в трубі з гарячою водою в формулах (5.7), (5.9), (5.14), (5.16) замість d_1 потрібно використовувати $(d_1 - 2\delta_n)$, а лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l розраховується за формулою (5.20) з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$K_l^H = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_e \cdot (d_1 - 2\delta_n)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \ln \frac{d_1 + 2\delta_n}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}} , \frac{Вт}{\text{м} \cdot ^\circ C} \quad (5.20)$$

14. Проаналізувати проведені розрахунки процесу теплопередачі у теплообмінному апараті та зробити висновки про кращий варіант теплообмінника з точки зору довжини труб коли існує протитечія і відсутній накип в трубах.

Розглянемо приклад виконання розрахунку задачі №2 за темою «Теплопередача» розрахункової роботи студентів.

Дано:

n=4 – варіант завдання у прикладі

$$N=n+a_1=4+54=58$$

a_2 – бронза

$$D=0,1 \cdot n+0,1=0,1 \cdot 4+0,1=0,5 \text{ м}$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{15_{\text{мм}}}{17_{\text{мм}}} = \frac{0,015_{\text{м}}}{0,017_{\text{м}}}$$

$$t_1' = (n+a_5)=(4+115)=119 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_1'' = (n+a_6)=(4+85)=89 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_2' = (n+a_7)=(4+15)=19 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$t_2'' = (n+a_8)=(4+32)=36 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$Q=(10 \cdot n+a_9)=10 \cdot 4+650=690 \text{ кВт}$$

$$\delta_n=a_{10}=n \cdot a_{10}=4 \cdot 0,2=0,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_n=a_{11}=1,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$$

$$l_{\text{пр}} - ? \quad l_{\text{прот}} - ? \quad l_{\text{пр}}^{\text{н}} - ? \quad l_{\text{прот}}^{\text{н}} - ?$$

Рішення:

1. Визначальна температура:

$$\text{гарячої води} \quad t_z = \frac{t_1' + t_1''}{2} = \frac{119 + 89}{2} = 104 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$\text{холодної води} \quad t_x = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{19 + 36}{2} = 28 \text{ } ^\circ \text{C}$$

2. Теплофізичні властивості за додатком 2 у таблиці 2:

- при визначальній температурі гарячої води t_z :

$$C_z=4,235 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}, \rho_z=954 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \nu_z=0,295 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda_z=0,684 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}, \text{Pr}_z=1,7;$$

- при визначальній температурі холодної води t_x :

$$C_x = 4,170 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}, \rho_x = 997 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \nu_x = 0,295 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda_x = 0,612 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}, \text{Pr}_x = 6.$$

3. Знаходимо витрати гарячої води G_z та холодної води G_x :

$$G_z = \frac{Q}{C_z \cdot (t_1' - t_1'')} = \frac{690}{4,235 \cdot (119 - 89)} = 5,43 \text{ кг/с}$$

$$G_x = \frac{Q}{C_x \cdot (t_2'' - t_2')} = \frac{690}{4,170 \cdot (35 - 19)} = 9,73 \text{ кг/с}$$

4. Визначальний розмір для гарячої води – це d_1 без накипу, м, а для холодної води – це еквівалентний діаметр міжтрубного простору:

$$d_{\text{екв}} = \frac{D^2 - N \cdot d_2^2}{D + N \cdot d_2} = \frac{0,5^2 - 58 \cdot 0,017^2}{0,5 + 58 \cdot 0,017} = 0,1676 \text{ м}$$

5. Визначаємо швидкість гарячої та холодної води:

$$V_z = \frac{4 \cdot G_z}{\pi \cdot N \cdot \rho_z \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 5,43}{3,14 \cdot 58 \cdot 954 \cdot 0,015^2} = 0,555 \text{ м/с}$$

$$V_x = \frac{4 \cdot G_x}{\pi \cdot \rho_x \cdot d_{\text{екв}}^2} = \frac{4 \cdot 9,73}{3,14 \cdot 997 \cdot 0,1676^2} = 0,443 \text{ м/с}$$

6. Визначаємо Критерій Рейнольдса для гарячої та холодної води:

$$\text{Re}_z = \frac{V_z \cdot d_1}{\nu_z} = \frac{0,555 \cdot 0,015}{0,285 \cdot 10^{-6}} = 29200$$

$$\text{Re}_x = \frac{V_x \cdot d_{\text{екв}}}{\nu_x} = \frac{0,443 \cdot 0,1676}{0,9 \cdot 10^{-6}} = 82500$$

7. Визначаємо режим руху рідини за критерієм Рейнольдса для гарячої та холодної води окремо.

Якщо $Re > 10000$, то режим турбулентний і критерій Нусельта розраховують за виразом:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25},$$

де Pr_c - критерій Прандтля стінки приймається за додатком 1 у таблиці 1.

У виразі для розрахунку критерію Нусельта відношенням (Pr_c/Pr_p) можна знехтувати і прийняти його рівним одиниці $(Pr_c/Pr_p = 1)$.

$$Nu_z = 0,021 \cdot Re_z^{0,8} \cdot Pr_z^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot 29200^{0,8} \cdot 1,7^{0,43} = 98,5$$

$$Nu_x = 0,021 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr_x^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_p} \right)^{0,25} = 0,021 \cdot 82500^{0,8} \cdot 6^{0,43} = 389$$

8. Визначаємо коефіцієнти тепловіддачі гарячої та холодної води:

$$\alpha_z = \frac{Nu_z \cdot \lambda_z}{d_1} = \frac{98,5 \cdot 0,684}{0,015} = 4492 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{екв}} = \frac{389 \cdot 0,612}{0,1676} = 1420 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

9. Визначаємо для одношарової циліндричної стінки товщиною $(d_1 - d_2)/2$ лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l :

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_z \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}} = \frac{3,14}{\frac{1}{4492 \cdot 0,015} + \frac{1}{2 \cdot 42} \cdot \ln \frac{0,017}{0,015} + \frac{1}{1420 \cdot 0,1676}} = 15302 \frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$$

10. Побудуємо графіки для розрахунків середнього температурного напору для прямотечії і протитечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l (рис.5.1 і рис.5.2).

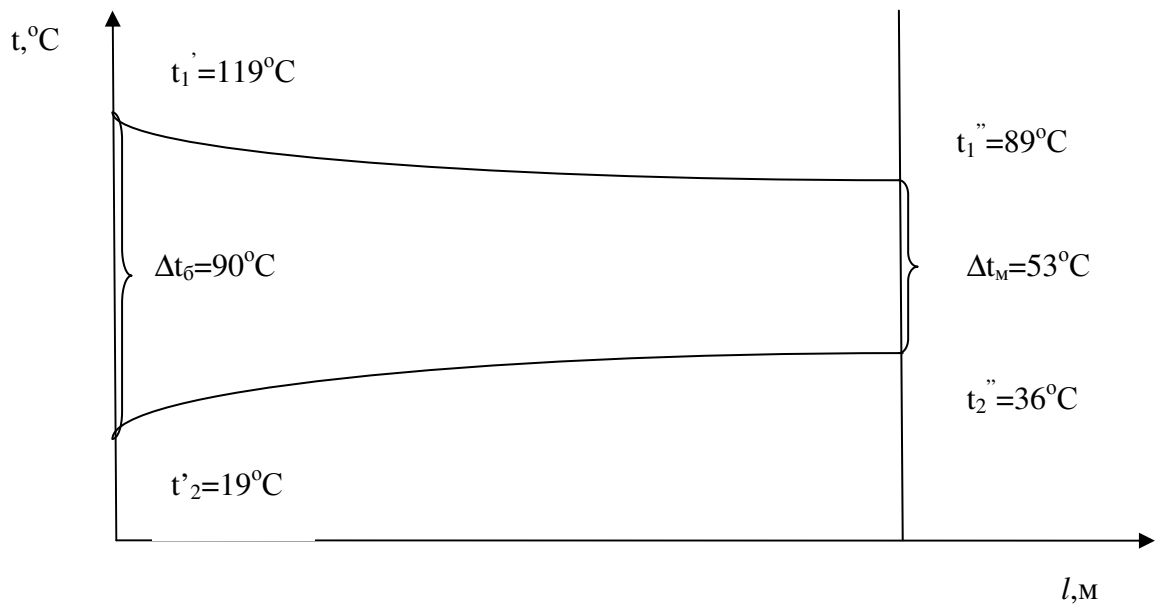


Рис. 5.1 - Графік для розрахунку середнього температурного напору для прямотечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

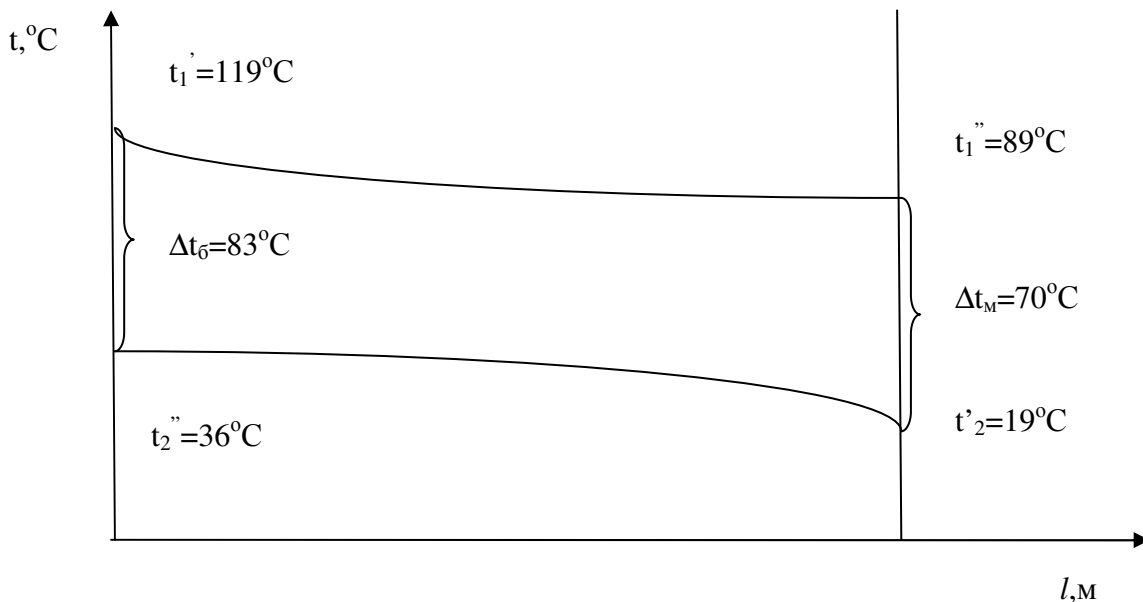


Рис. 5.2 - Графік для розрахунку середнього температурного напору для протитечії в трубках з гарячою водою по довжині теплообмінного апарату l .

11. Визначаємо середній температурний напір:

для прямотечії:

$$\Delta t_{np} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}} = \frac{(119 - 19) - (89 - 36)}{\ln \frac{(119 - 19)}{(89 - 36)}} = \frac{47}{0,635} = 74^{\circ} C$$

для протитечії:

$$\Delta t_{прот} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} = \frac{(119 - 36) - (89 - 19)}{\ln \frac{(119 - 36)}{(89 - 19)}} = 76^{\circ} C$$

12. Визначаємо довжину корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії:

$$l_{np} = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{np}} = \frac{690 \cdot 10^3}{153,02 \cdot 74} = 60,94 м$$

$$l_{прот} = \frac{Q}{K_l \cdot \Delta t_{прот}} = \frac{690 \cdot 10^3}{153,02 \cdot 76} = 59,33 м$$

13. Визначаємо лінійний коефіцієнт теплопередачі на 1 м довжини каналу l розраховується з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$K_l^H = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_z \cdot (d_1 - 2\delta_n)} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{a2}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \ln \frac{d_1 + 2\delta_n}{d_1} + \frac{1}{\alpha_x \cdot d_{екв}}}, \frac{Вт}{м \cdot ^{\circ}C}$$

Знайдемо у додатку 3 за таблицею 3 λ_{a2} для матеріалу a_2 - бронза, з якого виготовлені труби теплообмінного апарату за умовою прикладу задачі №2.

Обираємо за додатком 3 з таблиці 3 для бронзи коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_{a2}=42 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}.$$

$$K_l^H = \frac{3,14}{\frac{1}{4492(0,015-2 \cdot 0,0008)} + \frac{1}{2 \cdot 42} \cdot \ln \frac{0,017}{0,015} + \frac{1}{2 \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{(0,015+2 \cdot 0,0008)}{0,015} + \frac{1}{14200,1676}} = 58,17 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

Визначаємо довжину корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою:

$$l_{np}^H = \frac{Q}{K_l^H \cdot \Delta t_{np}} = \frac{690 \cdot 10^3}{58,17 \cdot 74} = 160,29 м$$

$$l_{прот}^H = \frac{Q}{K_l^H \cdot \Delta t_{прот}} = \frac{690 \cdot 10^3}{58,17 \cdot 76} = 156,08 м$$

14. За результатами розрахунків довжини корпусу теплообмінника для прямотечії і протитечії без накипу та з урахуванням накипу шару на внутрішній поверхні трубок з гарячою водою можна зробити такі висновки, що найвигідніші умови теплопередачі при протитечії без накипу, тому що коефіцієнт теплопередачі значно більший ніж з шаром накипу

$$K_l = 153,02 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} > K_l^H = 58,17 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \text{ і довжина трубок апарату при цьому найменша } - l_{прот} = 59,33 м.$$

6. Варіанти завдань до розрахункової роботи студентів

Для кожної групи студентів для напрямів підготовки 6.050503 «Машинобудування», 6.050502 «Інженерна механіка» викладачем з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі -1. Теплові процеси» для виконання

розрахункової роботи за темами «Конденсація» (задача №1) і «Теплопередача» (задачі №2) після вивчення даних тем на лекціях видається індивідуальний варіант для виконання задачі № 1 за таблицею 6.1 і задачі № 2 за таблицею 6.2.

Таблиця 6.1 – Варіанти до задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»

| Варі- ант | a_1 | a_2 |
|--------------|-------|-------|
| 1 | 90 | 0,1 |
| 2 | 100 | 0,2 |
| 3 | 110 | 0,3 |
| 4 | 120 | 0,4 |
| 5 | 130 | 0,5 |

Таблиця 6.2 – Варіанти до задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»

| Варі- ант | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 | a_7 | a_8 | a_9 | a_{10} | a_{11} |
|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| 1 | 48 | сталь | 10 | 12 | 100 | 70 | 12 | 26 | 500 | 0,05 | 2,2 |
| 2 | 50 | мідь | 12 | 14 | 105 | 75 | 13 | 28 | 550 | 0,10 | 2,0 |
| 3 | 52 | латунь | 14 | 16 | 110 | 80 | 14 | 30 | 600 | 0,15 | 1,8 |
| 4 | 54 | бронза | 15 | 17 | 115 | 85 | 15 | 32 | 650 | 0,20 | 1,6 |
| 5 | 56 | алюмін ій | 16 | 19 | 120 | 90 | 16 | 34 | 700 | 0,25 | 1,4 |

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця 1 - Фізичні властивості сухого повітря ($B = 760$ мм рт. ст.
 $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $C_p, \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{K}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{K}$ | $a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | Pr |
|---------------------|-----------------------|---|--|-------------------------------------|--|---------------------------------------|-------|
| -30 | 1,453 | 1,013 | 2,2 | 14,9 | 15,7 | 10,8 | 0,723 |
| -20 | 1,395 | 1,009 | 2,28 | 16,2 | 16,2 | 12,79 | 0,716 |
| -10 | 1,342 | 1,009 | 2,36 | 17,4 | 16,7 | 12,43 | 0,712 |
| 0 | 1,293 | 1,005 | 2,44 | 18,8 | 17,2 | 13,28 | 0,707 |
| 10 | 1,247 | 1,005 | 2,51 | 20 | 17,6 | 14,16 | 0,706 |
| 20 | 1,205 | 1,005 | 2,59 | 21,4 | 18,1 | 15,06 | 0,703 |
| 30 | 1,165 | 1,005 | 2,67 | 22,9 | 18,9 | 16 | 0,701 |
| 40 | 1,128 | 1,005 | 2,76 | 24,3 | 19,1 | 16,96 | 0,699 |
| 50 | 1,090 | 1,005 | 2,83 | 25,7 | 19,6 | 17,95 | 0,698 |
| 60 | 1,060 | 1,005 | 2,9 | 26,2 | 20,1 | 18,97 | 0,696 |
| 70 | 1,029 | 1,009 | 2,96 | 28,6 | 20,6 | 20,02 | 0,694 |
| 80 | 1 | 1,009 | 3,05 | 30,2 | 21,1 | 21,09 | 0,692 |
| 90 | 0,972 | 1,009 | 3,13 | 31,9 | 21,5 | 22,1 | 0,69 |
| 100 | 0,946 | 1,009 | 3,21 | 33,6 | 21,9 | 24,13 | 0,688 |
| 120 | 0,898 | 1,009 | 3,34 | 36,8 | 22,8 | 25,45 | 0,686 |
| 140 | 0,854 | 1,013 | 3,49 | 40,3 | 23,7 | 27,3 | 0,684 |
| 160 | 0,815 | 1,017 | 3,64 | 43,9 | 24,5 | 30,09 | 0,682 |
| 180 | 0,779 | 1,022 | 3,78 | 47,5 | 25,3 | 32,49 | 0,681 |
| 200 | 0,745 | 1,026 | 3,93 | 51,4 | 26 | 34,85 | 0,68 |
| 250 | 0,674 | 1,038 | 4,27 | 61 | 27,4 | 40,61 | 0,677 |

Таблиця 2 - Фізичні властивості води на лінії насичення

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-5},$ Па | $\rho,$ кг/м^3 | $i,$ кДж/кг | $C_p,$ $\text{кДж/кг}^\circ\text{K}$ | $\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт/м}^\circ\text{K}$ | $\alpha \cdot 10^8,$ $\text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6,$ Па с | $\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$ | $\beta \cdot 10^4$ K^{-1} | $\sigma \cdot 10^4$ Н/м | Pr |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|---|--|---|---------------------------|--|---------------------------------------|----------------------------|-------|
| 0 | 1,013 | 999,9 | 0 | 4,212 | 55,1 | 13,1 | 1788 | 1,789 | -0,63 | 756,4 | 13,67 |
| 10 | 1,013 | 999,7 | 42,02 | | 57,4 | 13,7 | 1306 | 1,306 | 0,7 | 741,6 | 9,52 |
| 20 | 1,013 | 998,2 | 83,91 | 4,183 | 59,9 | 14,3 | 1004 | 1,006 | 1,82 | 726,9 | 7,02 |
| 30 | 1,013 | 995,7 | 125,7 | 4,174 | 61,8 | 14,9 | 801,5 | 0,805 | 3,21 | 712,2 | 5,42 |
| 40 | 1,013 | 992,2 | 167,5 | 4,174 | 63,5 | 15,3 | 653,3 | 0,659 | 3,87 | 696,5 | 4,31 |
| 50 | 1,013 | 988,1 | 209,3 | 4,174 | 54,8 | 15,7 | 649,4 | 0,556 | 4,49 | 675,9 | 3,54 |
| 60 | 1,013 | 983,2 | 251,1 | 4,179 | 65,9 | 16 | 469,9 | 0,478 | 5,11 | 662,2 | 2,98 |
| 70 | 1,013 | 977,8 | 293 | 4,187 | 56,8 | 16,3 | 406,1 | 0,415 | 5,7 | 643,5 | 2,55 |
| 80 | 1,013 | 971,8 | 336 | 4,195 | 67,4 | 16,6 | 355,1 | 0,365 | 6,32 | 625,9 | 2,21 |
| 90 | 1,013 | 965,3 | 377 | 4,208 | 68 | 16,8 | 314,9 | 0,326 | 6,95 | 607,2 | 1,95 |
| 100 | 1,013 | 958,4 | 419,1 | 4,22 | 68,3 | 16,9 | 282,5 | 0,295 | 7,52 | 588,6 | 1,75 |
| 110 | 1,43 | 951 | 461,4 | 4,233 | 68,5 | 17 | 259 | 0,272 | 8,08 | 569 | 1,6 |
| 120 | 1,98 | 943,1 | 503,7 | 4,25 | 68,6 | 17,1 | 237,4 | 0,252 | 8,64 | 548,4 | 1,47 |
| 130 | 2,7 | 934,8 | 545,4 | 4,256 | 68,6 | 17,2 | 217,8 | 0,233 | 9,19 | 528,8 | 1,26 |
| 140 | 3,61 | 926,1 | 589,1 | 4,287 | 68,5 | 17,2 | 201,1 | 0,217 | 9,72 | 507,2 | 1,26 |
| 150 | 4,76 | 917 | 632,2 | 4,313 | 68,4 | 17,3 | 186,4 | 0,203 | 10,03 | 486,6 | 1,17 |
| 160 | 6,18 | 907,4 | 675,4 | 4,346 | 68,3 | 17,3 | 173,6 | 0,191 | 10,8 | 466 | 1,1 |
| 170 | 7,92 | 897,3 | 719,3 | 4,38 | 67,9 | 17,3 | 162,8 | 0,181 | 11,3 | 443,4 | 1,05 |
| 180 | 10,03 | 885,9 | 753,3 | 4,417 | 67,4 | 17,2 | 153 | 0,173 | 11,9 | 422,8 | 1 |
| 190 | 12,55 | 876 | 807,8 | 4,459 | 67 | 17,1 | 144,2 | 0,165 | 12,6 | 400,2 | 0,96 |
| 200 | 15,55 | 863 | 862,5 | 4,505 | 56,3 | 17 | 136,4 | 0,158 | 13,3 | 376,7 | 0,93 |

Таблиця 3 - Густина, теплопровідність і теплоємність будівельних теплоізоляційних та інших матеріалів

| Матеріал | ρ , кг/м ³ | t, °C | λ , Вт/м °K | C, кДж/кг °K |
|------------------|----------------------------|-------------|---------------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сталь вуглецева | 7800 | 100 ... 600 | 54,4 ... 33,5 | - |
| Сталь нержавіюча | 7800 | 100 ... 90 | 15,5 ... 22 | - |
| Мідь | 8800 | 0 ... 600 | 393 ... 354 | 0,393 |
| Латунь | 8600 | 0 ... 600 | 100 ... 151 | - |
| Алюміній | 2700 | 0 ... 600 | 202 ... 422 | - |
| Бронза | 8000 | 20 | 42 | - |
| Чавун | 7220 | 20 | 65 | - |
| Залізо котлове | 7800 | 0 ... 600 | 63 ... 31 | - |

Таблиця 4 - Фізичні властивості водяної пари на лінії насичення

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p \cdot 10^{-5},$ Па | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $t_{\text{ф}},$ кДж/кг | $r,$ кДж/кг | $C_p,$ кДж/кг $^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^2,$ Вт/м $^\circ\text{C}$ | $a \cdot 10^6,$ м ² /с | $\mu \cdot 10^6,$ Па с | $\nu \cdot 10^6,$ м ² /с | Pr |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------|--|------|
| 100 | 1.013 | 0.598 | 2675.9 | 2256.8 | 2.135 | 2.372 | 18.58 | 11.97 | 20.02 | 1.08 |
| 110 | 1.43 | 0.826 | 2691.4 | 2230.4 | 2.177 | 2.489 | 13.83 | 12.46 | 15.07 | 1.09 |
| 120 | 1.98 | 1.121 | 2706.8 | 2202.8 | 2.206 | 2.593 | 10.50 | 12.85 | 11.46 | 1.09 |
| 130 | 2.70 | 1.496 | 2720.3 | 2174.3 | 2.257 | 2.686 | 7.972 | 13.24 | 8.85 | 1.11 |
| 140 | 3.61 | 1.966 | 2734.1 | 2145.0 | 2.315 | 2.791 | 6.130 | 13.54 | 6.89 | 1.12 |
| 150 | 4.76 | 2.547 | 2746.7 | 2114.4 | 2.395 | 2.884 | 4.828 | 13.93 | 5.47 | 1.16 |
| 160 | 6.18 | 3.258 | 2758.0 | 2082.0 | 2.479 | 3.012 | 3.722 | 14.32 | 4.30 | 1.18 |
| 170 | 7.92 | 4.122 | 2768.9 | 2049.5 | 2.583 | 3.128 | 2.939 | 14.72 | 3.57 | 1.12 |
| 180 | 10.03 | 5.157 | 2778.5 | 2015.2 | 2.709 | 3.268 | 2.389 | 15.11 | 2.93 | 1.25 |
| 190 | 12.55 | 6.394 | 2786.4 | 1978.4 | 2.865 | 3.419 | 1.872 | 15.60 | 2.44 | 1.30 |
| 200 | 15.55 | 7.862 | 2793.1 | 1940.8 | 3.023 | 3.547 | 1.492 | 15.99 | 2.03 | 1.36 |
| 210 | 19.08 | 9.588 | 2798.2 | 1900.5 | 3.199 | 3.722 | 1.214 | 16.38 | 1.71 | 1.41 |
| 220 | 23.20 | 11.62 | 2801.5 | 1857.8 | 3.408 | 3.896 | 0.983 | 16.87 | 1.45 | 1.47 |
| 230 | 27.98 | 13.99 | 2803.2 | 1813.0 | 3.634 | 4.094 | 0.806 | 17.36 | 1.24 | 1.54 |
| 240 | 33.48 | 17.76 | 2803.2 | 1765.6 | 3.881 | 4.291 | 0.658 | 17.76 | 1.06 | 1.61 |
| 250 | 38.78 | 19.98 | 2801.1 | 1715.8 | 4.158 | 4.517 | 0.544 | 18.25 | 0.913 | 1.68 |
| 260 | 46.94 | 23.72 | 2796.5 | 1661.4 | 4.468 | 4.803 | 0.453 | 18.84 | 0.794 | 1.76 |
| 270 | 55.05 | 28.09 | 2789.8 | 1604.4 | 4.815 | 5.106 | 0.378 | 19.32 | 0.688 | 1.82 |
| 280 | 64.19 | 33.19 | 2779.7 | 1542.9 | 5.234 | 5.489 | 0.313 | 19.91 | 0.600 | 1.90 |
| 290 | 74.45 | 39.15 | 2766.4 | 1476.3 | 5.694 | 5.827 | 0.261 | 20.60 | 0.526 | 2.01 |
| 300 | 85.92 | 46.21 | 2749.4 | 1404.3 | 6.280 | 6.268 | 0.216 | 21.29 | 0.461 | 2.13 |

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

з кредитного модуля «Процеси, апарати і машини галузі. Теплові процеси – 1»

Прийняв:
Казак
Ірина Олександрівна
Захищено з оцінкою

Виконав:
Косенко Євген Ігорович
студент групи ЛУ-21
факультет ІХФ

Київ
201

Список рекомендованої літератури

1. Малиновский В.В. Расчеты оборудования химических производств. Примеры и задания / В.В.Малиновский, И.В. Коваленко.– К.: УМК ВО, 1988. – 220 с.
2. Малиновский В.В. Тепловые процессы в технологи переработки пластмасс. Текст лекцій / В.В.Малиновский. – К.: КПИ, 1980. – 68с.
3. Малиновский В.В. Гидродинамические процессы в химической технологии. Текст лекцій / В.В.Малиновский. – К.: КПИ, 1987. – 68 с.
4. Малиновський В.В. Процеси та апарати хімічної технології в прикладах і завданнях / В.В.Малиновський, І.В.Коваленко.– К.: УМК ВО, 1992.– 192 с.
5. Малиновский В.В. Основные процессы химических производств / В.В.Малиновский, И.В. Коваленко.– К.: УМК ВО, 1990. – 228 с.
6. Малиновский В.В., Коваленко И.В. Процессы и аппараты химической технологии в примерах и задачах. – К.: УМК ВО , 1992. – 196 с.
7. Коваленко І.В., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв: Підручник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: “Інрес”, “Воля”, 2006. – 261с.
8. Коваленко І.В. Навчальні дослідження процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: Навчальний посібник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: “Норіта-плюс”, 2006. – 160с.
9. Коваленко І.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв. Навчальний посібник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський.– К: “Норіта-плюс”, 2006. – 212с.
10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ | 3 |
| 1. Загальні положення щодо організації розрахункової роботи студентів..... | 4 |
| 2. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»..... | 6 |
| 3. Методика виконання розрахунку задачі №1 розрахункової роботи студентів за темою «Конденсація»..... | 8 |
| 4. Теоретичні відомості щодо виконання задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача»..... | 13 |
| 5. Методика виконання розрахунку задачі №2 розрахункової роботи студентів за темою «Теплопередача» | 14 |
| 6. Варіанти завдань до розрахункової роботи студентів..... | 26 |
| Додатки..... | 28 |
| Список рекомендованої літератури | 32 |